

IDENTIFIKASI BEBERAPA MATERIAL PENYIMPAN KALOR DAN KARAKTERISTIK PELEBURAN MATERIAL TERPILIH PADA ALAT PENUKAR KALOR TIPE CANGKANG-PIPA

Susanto Johanes¹

ABSTRACT

This laboratory research used some equipment tests : DSC (Defferential Scanning Calorimetry) made by Mettler, Thermal Conductivity Meter TC-31 Model, Picnometer, Hydrometer, and Viscometer. The research was proposed to identify thermophysic properties of some heat storage materials, which could be found in market (around of Yogyakarta), i.e. paraffin, fat, mikro (mixture of paraffin, damar, fat, and vaseline), gondorukem, and damar.

The result of this identification, was chosen the best of storage energy materials, as a test material on melting process with a constant heat flux of heater surface, on in-line tubes bank of shell and tube type heat exchanger.

As the basic of thermophysic properties and material temperature of the test, will be got melting characteristic as heat transfer coefficient for time, modus of dominant heat transfer along melting process, and Nusselt number correlation.

A numerical computation was used as a comparative test.

The result of the research showed that mikro was the best of among the tested materials, and there was a good agreement between melting test result and theoretical analysis.

PENGANTAR

Latar Belakang

Rancangan suatu alat penyimpan kalor yang baik, sangat berkaitan dengan pemilihan jenis material penyimpan yang sesuai, serta perlu pengkajian terhadap mekanisme perpindahan panas, baik pada proses peleburan maupun proses pembekuan.

Identifikasi terhadap material penyimpan kalor telah ada, baik untuk aplikasi daerah temperatur rendah maupun tinggi, misalnya material yang terdiri dari senyawa organik maupun anorganik serta garam anorganik dan metal [Abhat, 1983]. Namun dengan mengidentifikasi material baru, baik dengan cara mencampur beberapa bahan yang telah ada, maupun mengkombinasikan material tersebut dengan material lainnya, maka ada

¹ Dosen Program Diploma, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, UGM.

peluang diperoleh material yang memiliki sifat-sifat termofisik terbaik, yang merupakan salah satu pertimbangan utama dalam pemilihan material penyimpan kalor.

Informasi tentang karakteristik perpindahan panas pada proses penyimpanan kalor laten belum banyak, karena hal ini menyangkut transformasi energi yang bersifat transien dan rumit.

Tinjauan Pustaka

Bathel (1979) telah melakukan pengujian perpindahan panas peleburan parafin (n-octadecane, temperatur lebur 301,3 K) disekitar silinder horizontal yang dipanaskan dengan fluks kalor seragam. Kemudian melakukan peleburan/pembekuan dengan material parafin (n-heptadecane, temperatur lebur 22,2 °C), dipanaskan/didinginkan disekitar silinder horizontal bersirip longitudinal [Bathel, 1981]. Dari dua penelitian tersebut menunjukkan bahwa terdapat pengaruh perpindahan panas konveksi selama proses peleburan berlangsung. Hal ini ditunjukkan oleh posisi bidang antar permukaan yang simetri terhadap sumbu silinder pada saat-saat awal peleburan, namun dengan bertambahnya waktu maka posisi bidang antar permukaan tidak simetri lagi, peristiwa ini disebabkan oleh proses perpindahan panas konveksi alami yang terjadi.

Cara klasik dan praktis untuk pengkajian secara teoritik terhadap perpindahan panas pada sistem yang mengalami perubahan fasa, adalah dengan asumsi bahwa konduksi merupakan satu-satunya mekanisme transport energi [Carslaw & Jaeger, 1969].

Landasan Teori

Beberapa perhitungan yang dilakukan, didasarkan pada teori dengan persamaan-persamaan berikut ini:

Koefisien perpindahan panas konveksi rata-rata (\bar{h}) dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\bar{h} = \frac{q}{Tw - Tm} \quad (1)$$

dengan q = fluks kalor permukaan pemanas, Tw = temperatur permukaan pemanas dan Tm = Temperatur rata-rata material.

Secara kuantitatif, modus perpindahan panas yang paling dominan selama proses peleburan, dapat ditentukan berdasarkan besarnya nilai bilangan Grashof (Gr). Untuk nilai bilangan Grashof kurang dari 2000, maka modus perpindahan panas adalah konduksi. Bilangan Grashof dapat dirumuskan dengan persamaan :

$$Gr = \frac{g\beta(Tw - Tm)\delta^3}{\nu^2} \quad (2)$$

dengan g = percepatan gravitasi, β = koefisien ekspansi termal, dan ν = viskositas kinematik, dan δ = panjang karakteristik.

Korelasi bilangan Nusselt dapat dihitung dengan persamaan :

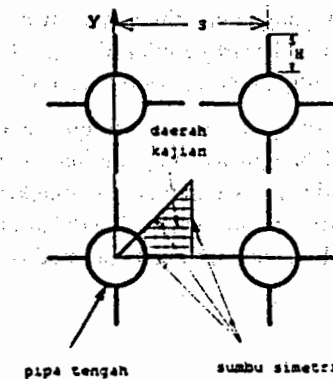
$$Nu = m(Ra/Ste)^n \quad (3)$$

dengan m & n adalah konstanta, sedangkan Ste adalah bilangan Stefan, yang dirumuskan dengan persamaan :

$$Ste = \frac{cp(Tw - Tm)}{L} \quad (4)$$

dengan cp = panas jenis, dan L = panjang pipa pemanas.

Pada perhitungan numerik, formulasi matematik dinyatakan dalam koordinat Cartesian dua dimensi, dengan daerah kajian yang dibatasi oleh dinding pipa, permukaan sirip dan sumbu-sumbu simetri, ditunjukkan pada gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Daerah kajian

Syarat-syarat batasnya adalah sebagai berikut :

1. permukaan pipa, $Tw = Tw(t)$, untuk $R = D/2$,
2. permukaan sirip, $Tw = Tw(t)$, untuk $y = 0$, $R < x < R+H$,
3. sumbu simetri, $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$, untuk $x = S/2$, $x = y$ & $y = 0$, $x > R+H$, dan
4. kondisi awal, $T \text{ material} = Ta$ (temperatur atmosfer), untuk $t = 0$.

Dengan melakukan pendekatan bahwa satu-satunya modus perpindahan panas adalah konduksi, dan nilai konduktivitas termalnya konstan, maka persamaan keseimbangan energi untuk analisa dua dimensi (dengan asumsi tidak terjadi perpindahan panas dalam arah aksial) adalah sebagai berikut :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\rho c_p}{k} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (6)$$

Persamaan beda hingga berdasarkan persamaan keseimbangan energi (6), adalah sebagai berikut :

$$q_{m,n} = q_i = \sum_j \frac{T_j - T_i}{R_{ij}} \quad (7)$$

dengan $q_{m,n}$ atau q_i = laju aliran kalor yang menuju nodal m,n atau i pada saat t , T_i = temperatur nodal m,n atau i , T_j & R_{ij} masing-masing adalah temperatur nodal j (nodal sekeliling m,n yang terkait) dan tahanan termal antara nodal i dan j .

Hipotesis

Sebagai batasan kuantitatif yang menunjukkan bahwa modus perpindahan panas konveksi sudah berpengaruh adalah besarnya nilai bilangan Grashof. Sekitar 2000. Jarak dan posisi antar pipa sangat menentukan besarnya bilangan Grashof.

Ada beberapa kemungkinan yang dapat terjadi dalam proses peleburan ini, kaitannya dengan modus perpindahan panas yang dominan. Pertama, satu-satunya modus perpindahan panas adalah konduksi. Sedangkan kemungkinan kedua adalah modus perpindahan konveksi sudah berpengaruh, namun konduksi masih menjadi modus yang dominan. Serta ketiga adalah konveksi merupakan modus perpindahan panas yang dominan.

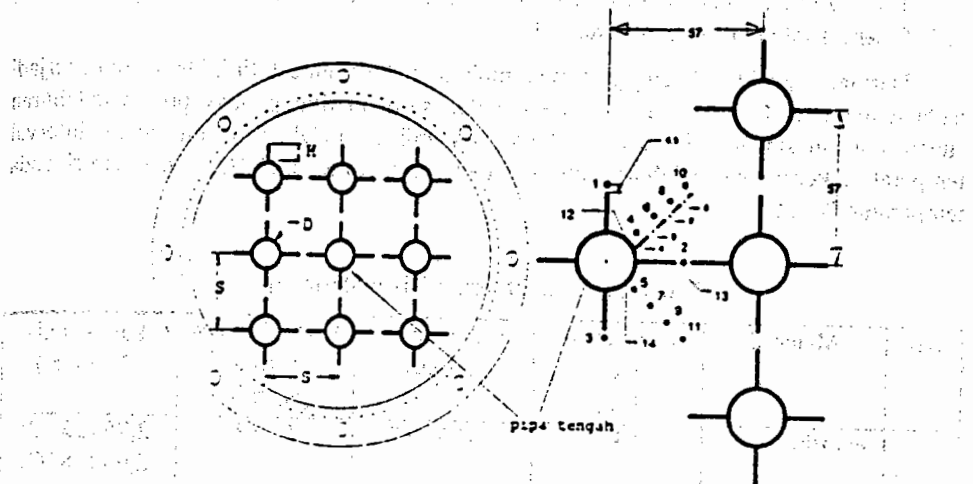
CARA PENELITIAN

Bahan dan Alat

Beberapa material yang digunakan dalam penelitian ini adalah parafin, kendal, mikro (campuran parafin, damar, kendal, dan vaselin, dengan prosentase berat berturut-turut adalah 45,5 %, 40,9 %, 6,8 % dan 6,8 %), gondorukem, dan damar. Dari ke lima material tersebut dipilih satu yang terbaik sebagai material uji pada proses peleburan, dengan menggunakan penukar kalor tipe cangkang pipa susunan pipa *in-line*, masing-masing pipa bersirip longitudinal. Pemilihan material tersebut didasarkan pada nilai sifat-sifat termofisiknya, terutama konduktivitas termal dan kalor latennya.

Pipa terbuat dari tembaga dengan ukuran sebagai berikut, panjang 32 cm, diameter 19 mm, jumlah 9 buah. Susunan pipa dan titik-titik pengukuran temperatur tampak seperti pada gambar 2. Nikelin dimasukkan ke dalam pipa sebagai alat pemanas.

Pembacaan temperatur pipa, sirip dan material mikro selama proses pengujian, dengan bantuan akusisi data.



Gambar 2. Susunan pipa & posisi pengukuran temperatur

Prosedur pelaksanaan

Pelaksanaan penelitian terdiri dari 2 macam pengujian, yaitu :

1. Pengujian sifat-sifat termofisik 5 macam material.
2. Pengujian utama berupa peleburan material terpilih (mikro), pada penukar kalor tipe cangkang-pipa, dengan 4 macam variasi fluks kalor permukaan.

Proses pengujian peleburan mikro dimulai pada saat temperatur mikro dan pipa sama atau hampir sama dengan temperatur atmosfer, dan diakhiri setelah seluruh material yang berada di daerah kajian melampaui temperatur lebur.

Analisis hasil

Hasil pengujian utama berupa data temperatur material sebagai fungsi waktu. Sebagai pembanding data tersebut adalah hasil perhitungan numerik. Besaran-besaran kuantitatif diperoleh dengan menggunakan data sifat-sifat termofisik material terpilih serta data pengujian utama. Kemudian dilakukan pembuatan grafik-grafik dan analisa kualitatif.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

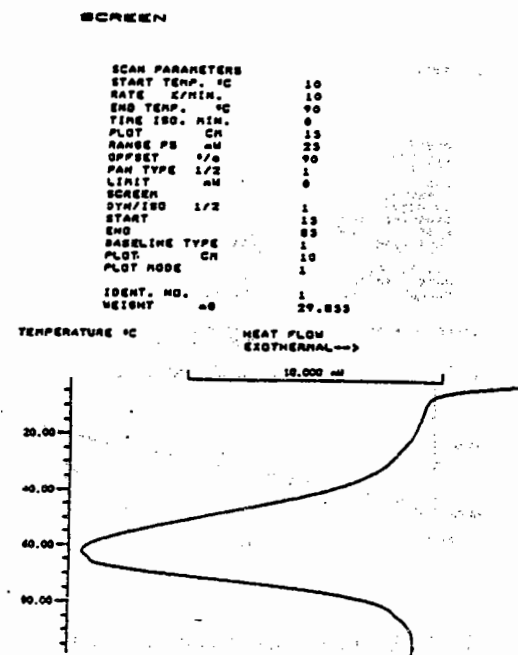
Hasil pengujian sifat-sifat termofisik ke 5 kandidat material penyimpan kalor, menunjukkan bahwa mikro memiliki nilai konduktivitas termal dan kalor laten yang paling besar, atas dasar ini maka mikro dipilih sebagai material uji peleburan. Hasil pengujian tersebut di atas disajikan dalam Tabel I.

Termograf hasil pengujian sifat-sifat termofisik mikro disajikan dalam gambar 3, 4, 5, & 6, serta sifat lainnya dalam Tabel II.

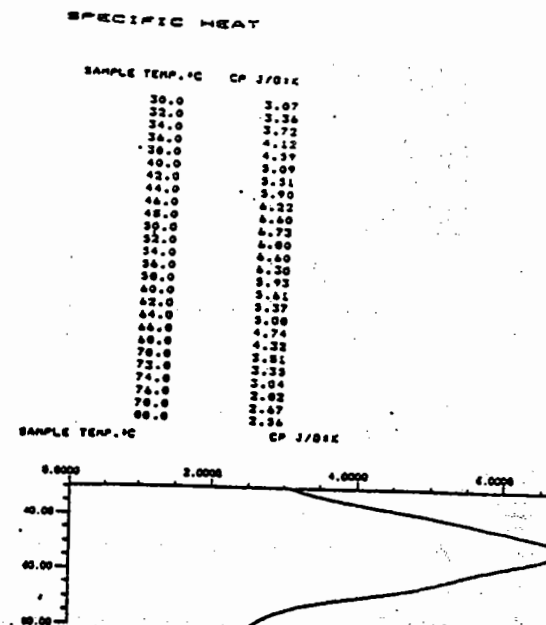
Dari termograf hasil pengujian menunjukkan bahwa puncak titik lebur mikro terjadi pada temperatur 47,1 °C, namun sebelum dan sesudah titik puncak proses peleburan sudah dan masih terjadi, dengan kata lain mikro melebur dalam suatu interval temperatur. Permulaan peleburan dimulai pada temperatur 42,2 °C, dan diakhiri pada temperatur 52 °C.

Tabel I. Sifat-sifat termofisik material uji

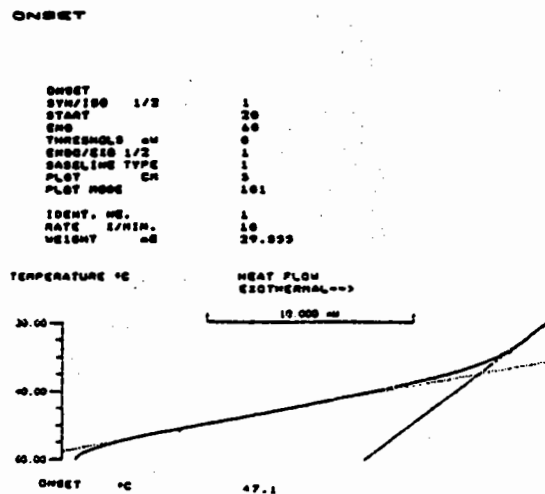
No.	Material	Temperatur Lebur (°C)	Kalor Laten (kJ/kg)	Konduktivitas Termal (W/m.K)	Panas Jenis (kJ/kg.K)
1	Parafin	53,6	105,317	0,268	2,75 (35 °C) 2,68 (78 °C)
2	Mikro	47,1	114,650	0,292	3,07 (30 °C) 2,56 (80 °C)
3	Kendal	50,0	56,473	0,217	3,23 (36 °C) 1,94 (80 °C)
4	Damar	52,0	6,046	0,131	2,53 (36 °C) 1,96 (80 °C)
5	Gondorukem	39,1	8,710	0,118	1,95 (36 °C) 1,93 (80 °C)



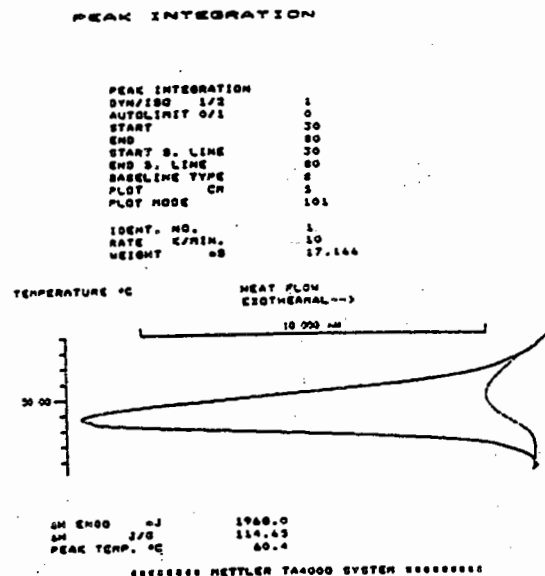
Gambar 3. Termograf proses peleburan mikro



Gambar 4. Termograf penentuan panas jenis mikro



Gambar 5. Termograf penentuan temperatur lebur mikro



Gambar 6. Termograf penentuan panas laten peleburan mikro

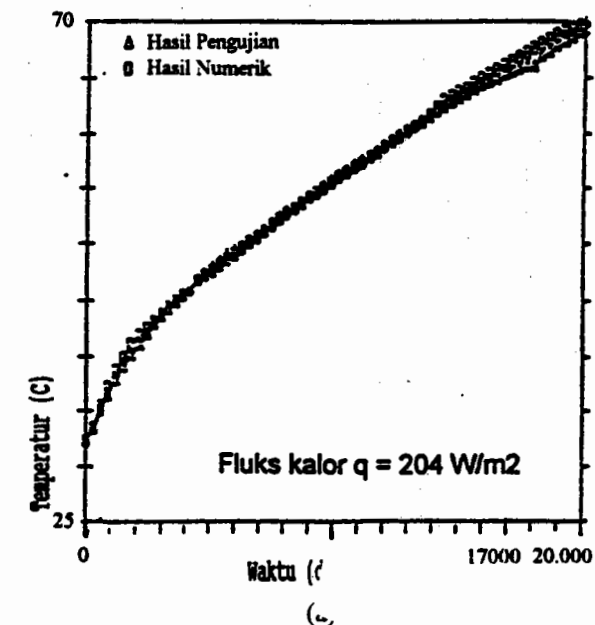
Tabel II. Massa jenis, koefisien ekspansi termal, dan viskositas dinamik mikro

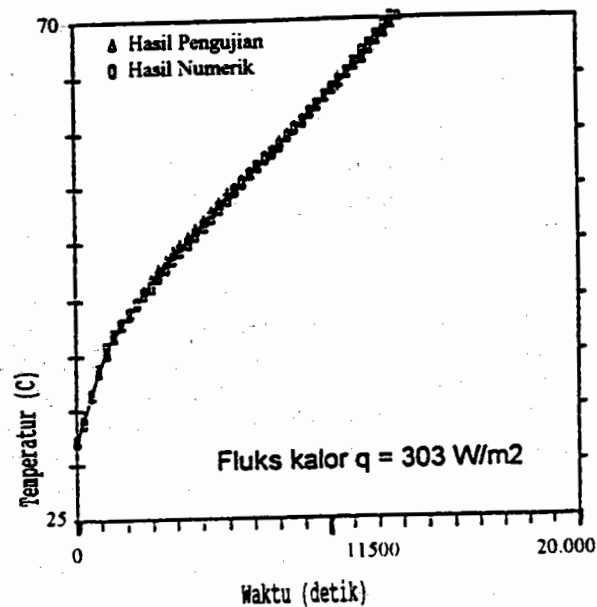
Temperatur (C)	50	55	60	65	70	75
ρ (kg/m)	784	773	762	759,12	755,16	-
β	$2,85 \cdot 10^{-3}$	$2,89 \cdot 10^{-3}$	$7,59 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	-	-
μ (kg/m.s)	-	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$8,37 \cdot 10^{-3}$	$2,87 \cdot 10^{-3}$	$6,00 \cdot 10^{-3}$	$3,70 \cdot 10^{-3}$

Sejarah temperatur pipa dan sirip ternyata menghasilkan kurva yang berimpit, hal ini menunjukkan bahwa temperatur pipa dan sirip dapat dianggap sama. Setelah dilakukan pemeriksaan terhadap modulus Biot ($Bi=h(V/A)/k$), dengan h = koefisien perpindahan panas, V = volume pipa, A = luas permukaan pipa, dan k = konduktivitas termal pipa, maka nilai modulus Biot jauh lebih kecil dari 0,1. Hal ini menunjukkan bahwa tahanan permukaan (konveksi) lebih besar daripada tahanan termal dalam (konduksi), sehingga temperatur seluruh permukaan pipa termasuk juga sirip dapat dianggap sama [Holman, 1976].

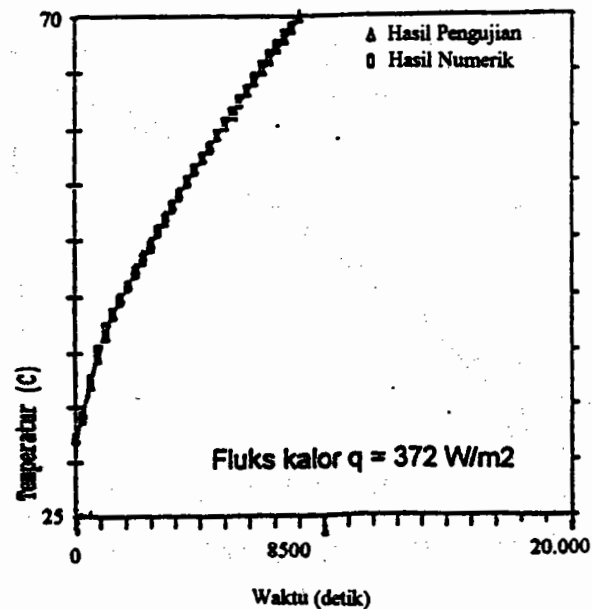
Sejarah temperatur material mikro hasil perhitungan numerik, diperoleh dengan menggunakan tambahan waktu sebesar 2,5 detik, agar memenuhi syarat-syarat stabilitas.

Secara umum dapat disimpulkan bahwa sejarah temperatur hasil pengujian & hasil analisa teoritik (numerik) terdapat kesesuaian. Perbandingan antara keduanya dapat dilihat pada gambar 7 (a), (b), (c), dan (d), merupakan sejarah temperatur titik 4 (pengujian) yang bersesuaian dengan titik (1,5) (analisa numerik).

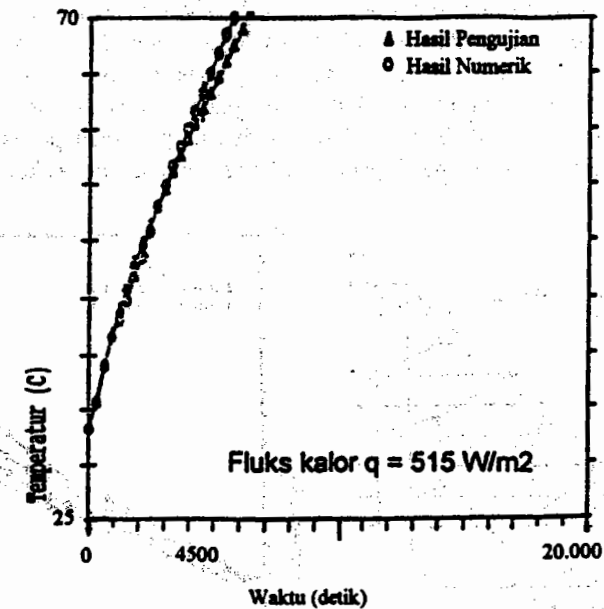




(b)



(c)



(d)

Gambar 7. Perbandingan sejarah temperatur mikro, hasil pengujian dan komputasi numerik, (a) untuk $q = 204 \text{ W/m}^2$, (b) untuk $q = 303 \text{ W/m}^2$, (c) untuk $q = 372 \text{ W/m}^2$, dan (d) untuk $q = 515 \text{ W/m}^2$

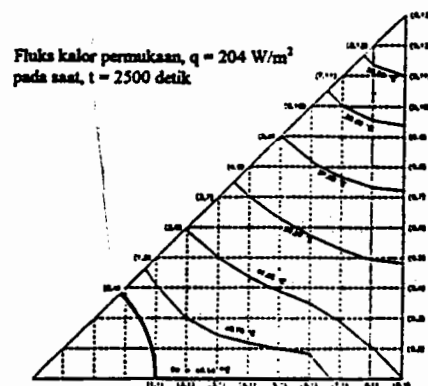
Kesesuaian tersebut terutama pada daerah fasa padat dan selama proses peleburan. Sedikit penyimpangan terjadi pada fasa cair, hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh variasi konduktivitas termal material mikro yang selama ini tidak terdeteksi (pengujian konduktivitas termal mikro hanya dalam fasa padat) serta pengaruh konveksi alami.

Grafik yang menunjukkan kurva isothermal hasil analisa numerik, dapat diperoleh dari sejarah temperatur material tersebut di atas, sehingga letak bidang antar permukaan pada setiap tambahan waktu tertentu dapat diketahui. Salah satu contohnya terlihat pada gambar 8 di bawah ini.

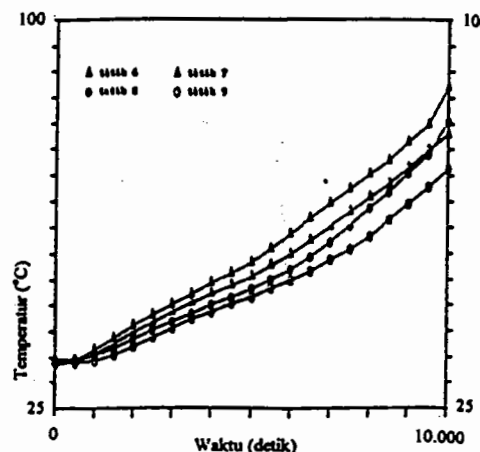
Referensi kuantitatif menunjukkan bahwa konveksi alami mulai terjadi apabila bilangan Grashof telah mencapai harga sekitar 2000 [Kreith, 1991]. Pada harga bilangan Grashof sekitar 2000, untuk pemanasan dengan fluks kalor permukaan 515 W/m^2 , 372 W/m^2 , 303 W/m^2 , dan 204 W/m^2 , pemanasan berlangsung berturut-turut sekitar 4500 detik, 8500 detik, 11500 detik, dan 17000 detik.

Kurva sejarah temperatur untuk 2 titik pengukuran pada proses peleburan, yang memiliki jarak sama dari sumbu pipa tengah, dengan posisi masing-masing adalah 45° dan -45° , mulai terjadi penyimpangan pada nilai bilangan Grashof tersebut. Salah satu contoh penyimpangan yang jelas terlihat adalah gambar 9 di bawah ini. Untuk mencapai nilai bilangan Grashof tersebut, proses pemanasan telah berlangsung sekitar 4500 detik.

Selain itu, pada proses pemanasan dengan fluks kalor permukaan 204 W/m^2 & 303 W/m^2 , pengaruh konveksi mulai terjadi ketika seluruh material mikro yang berada dalam daerah kajian sudah melebur, berarti selama proses peleburan satu-satunya modus perpindahan panas adalah konduksi. Sedangkan pada proses pemanasan dengan fluks kalor permukaan 372 W/m^2 & 515 W/m^2 , modus perpindahan panas konveksi sudah berpengaruh namun dominasi masih pada modus perpindahan panas konduksi.



Gambar 8. Garis isothermal material mikro



Gambar 9. Penyimpangan kurva temperatur, $q = 515 \text{ W/m}^2$

Untuk fluks kalor permukaan yang lebih besar, maka perbedaan antara permukaan pipa pemanas dengan material mikro adalah lebih besar, karena gradien temperatur pada permukaan pemanas lebih besar. Dengan demikian, untuk harga bilangan Grashof tertentu, maka ketebalan daerah lebur lebih kecil.

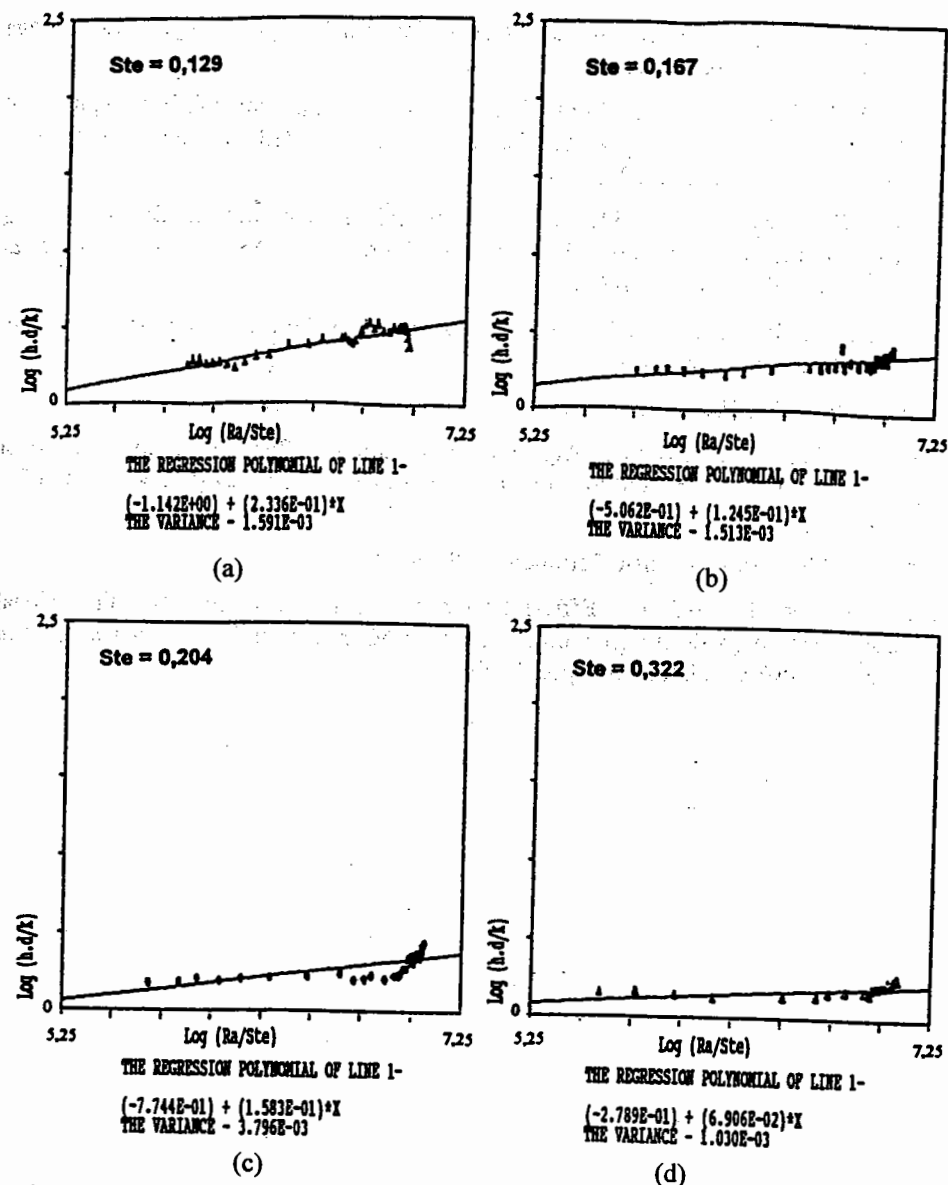
Dari hasil perhitungan diperoleh korelasi bilangan Nusselt, grafiknya dapat dilihat pada gambar 10 (a), (b), (c), dan (d). Korelasi tersebut berlaku untuk bilangan Grashof lebih besar dari 2000.

KESIMPULAN

Berikut ini adalah beberapa kesimpulan yang dapat diperoleh dari hasil pengujian sifat-sifat termofisik material uji, hasil pengujian peleburan mikro serta analisa teoritik.

1. Mikro memiliki sifat-sifat termofisik konduktivitas termal (pada temperatur kamar) dan kalor laten lebih besar daripada kandidat material uji lainnya, yaitu parafin, gondorukem, kendal, dan damar.
2. Mikro melebur dalam suatu interval temperatur, antara $42,2^\circ\text{C}$ sampai dengan 52°C .
3. Dalam proses peleburan mikro ini, pipa pemanas dapat dianggap sebagai *lumped capacity* karena modulus Biotnya kurang dari 0,1.

4. Pada proses peleburan dengan fluks kalor permukaan 204 W/m^2 & 303 W/m^2 , satu-satunya modus perpindahan panas adalah konduksi, sedangkan pada pemanasan dengan fluks kalor permukaan 372 W/m^2 & 515 W/m^2 modus perpindahan panas yang dominan adalah konduksi, namun pada saat-saat akhir peleburan konveksi alami mulai berpengaruh.



Gambar 10. Korelasi bilangan Nusselt, (a) untuk $Ste = 0,129$, (b) untuk $Ste = 0,167$, (c) untuk $Ste = 0,204$, dan (d) untuk $Ste = 0,322$.

5. Dengan asumsi konduksi merupakan satu-satunya mekanisme transport energi pada proses peleburan mikro, maka terdapat kesesuaian antara sejarah temperatur mikro hasil pengujian dengan analisa teoritik ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abhat, A., 1983, Low Temperatur Latent Heat Thermal Energy Storage, Heat Storage Material, *Solar Energy*, vol.30, No.4, pp.313-332.
- Bathel, A.G., Viskanta, R. & Leidenfrost, 1979, An Experimental Investigation of Natural Convection in the Melted Region Around a Heated Horizontal Cylinder, *J. Fluid Mech.*, vol.90, part 2, pp. 227-239.
- Bathel, A.G., Viskanta, R., 1981, Heat Transfer and Interface Motion During Melting and Solidification Around a Finned Heat Source/Sink, *ASME Journal of Heat Transfer*, vol.103, pp. 720-726.
- Carslaw, H.S. & Jaeger, A., 1969, *Conduction of Heat in Solids*, 2 ed., Oxford University at the Clarendon Press, New York.
- Holman, J.P., 1976, *Heat Transfer*, 4 ed., Tokyo Japan.
- Hasio J.S., 1985, An Efficient Algorithm For Finite- Difference Analyses of Heat Transfer with Melting and Solidification, *Numerical Heat Transfer*, Vol.8, pp.653-666.
- Kreith, F., 1991, *Prinsip-Prinsip Perpindahan Panas*, 3 ed..
- Rabin.Y & Korin.E, 1993, An Efficient Numerical Solution for the Multidimensional Solidification (or Melting) problem Using a Microcomputer, *Int.Journal of Heat Mass Transfer*, Vol.36, No.3, pp.673-683.

ELASTIC RECOVERY EFFECT ON VICKERS MICROHARDNESS OF HARD COATINGS

Viktor Malau¹

ABSTRACT

It has been commonly assumed that there is no elastic recovery in the Vickers indent diagonal on unloading and Vickers microhardness is load independent. Vickers microhardness measurements on hard coatings on WC-Co substrates were studied as a function of indentation load. The results of this research show that the conventional Vickers hardness increases with decreasing load. It further follows that the large increase in microhardness at light loads (up to 100 g) depends inversely on the elastic modulus of the hard coating. Microhardness numbers based on Vickers diagonal measurements are shown to have varying sensitivity to the elastic recovery effect. Depending on the coating thickness, the microhardness load profiles can indicate the existence of gradient residual stresses in the coating as well as effects due to the coating-substrate interface and the substrate hardness.

1. INTRODUCTION

Indentation testing is generally the only simple technique available for evaluating mechanical properties of hard coatings which are typically 2 - 10 μm thick. To minimize the effect of the underlying substrate, indentation loads used are normally 100 g or less. In the case of microhardness evaluations, complications in interpretation arise not only because of inherent measurement inaccuracies but also because of a more fundamental problem: at such light loads the measured microhardness is load dependent. This is not a problem in hardness testing of bulk materials because at sufficiently heavy load the indentation is produced by almost 100 % plastic deformation. In microhardness evaluations of hard coatings, the elastic recovery of material within the deformed zone may not be negligible. If this is ignored the measured microhardness values may produce an error associated with measurement inaccuracies.

This paper focuses on Vickers microhardness measurements on physically and chemically vapor-deposited (PVD and CVD) hard coatings on a common cemented carbide substrate to study the elastic recovery effect and its interaction with the varying micromechanical properties of the coatings and the underlying substrate.

¹ Dept. of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Gadjah Mada University, Yogyakarta